

土壁の力学特性および乾燥収縮に関する実験的研究

The Experimental Study on the Characteristic of the dynamics and the drying shrinkage property at "TSUCHIKABE" .

松村 光太郎

Kotaro MATSUMURA

1. はじめに

土壁は、中国地方において、木造軸組在来工法に用いられる壁材料の1つとして、従来から利用されていた。しかしながら、土壁は、工期が長く、左官職人の技能により耐久性が大きく影響するため、簡易的に施工でき、かつ耐久性の高い建築材料が好まれる現在の風潮では、施工数が減少の一途をたどっている。岡山県の左官業者からの聞き取り調査では、土壁が新築物件に利用されるケースは、全新築施工数の約 1.0 %程度だともいわれている。その一方で、土壁は、自然素材のみを利用している建築材料として、シックハウス問題等に有効であると見直されつつある。

そこで、本研究では、土壁の風合いを残しつつ、シックハウス問題に有効で、かつ職人の技能による差が解消でき、工期を減少することができる新しい材料としてのセメントを混入した土壁に利用される土（以後、セメントを混入した壁土と呼ぶ。）を開発するために、力学特性と乾燥収縮について実験的に検討し、基礎データを蓄積することを目的とする。なお、本研究で開発しようとしているセメントを混入した壁土は、現場で練り混ぜられ、その場で型枠に打ち込む工法が可能な現場施工用の壁土としての材料を最終目標としている。

2. 実験計画

2. 1 調合計画

本研究では、まき土（香川県産、気乾密度 2.32 g/cm^3 : S）、普通ポルトランドセメント（太平洋セメント（株）製、密度 3.16 g/cm^3 : C）、水（津山市上水道水 : W）、固形安定剤（（株）地球環境技術研究所製 : FC 剤）、太平洋ジブカル（太平洋マテリアル（株）製 : 膨張材）、および空気連行剤（山宗化学（株）製 : AE 剤）を使用した。

調合は、表-1 に示す因子と水準により計画を立て、表-2 に示す調合により実験を行なった。なお、水準は、土の質量に対して混入するセメント質量、水質量の割合を示す。ただし、AE 剤は、試練りによりワーカビリティが著しく悪かった調合について混入した。

表-1 調合に用いる因子と水準

因子	S	C	W
水準	1	0.03	0.100
		0.05	
		0.07	0.125
		0.10	
		0.15	0.150
		0.20	

表-2 調合表

調合名	単位水量 (kg/m^3)	W/C (%)	単位容積(kg/m^3)		混和材料		
			セメント	土	FC剤	膨張材	AE剤
C0-150	258	—	—	742	—	—	—
C3-150FE	254	500%	16.1	730	C×3%	C×10%	—
C5-150FE	251	300%	26.5	722	C×3%	C×10%	—
C7-150FE	249	214%	36.7	715	C×3%	C×10%	—
C7-125FE	216	179%	38.3	745	C×3%	C×10%	—
C7-100FE	181	143%	40.0	779	C×3%	C×10%	—
C10-150FE	245	150%	51.7	704	C×3%	C×10%	—
C10-125FE	213	125%	53.8	733	C×3%	C×10%	—
C10-100FE	178	100%	56.2	766	C×3%	C×10%	—
C15-150AFE	239	100%	75.5	686	C×3%	C×10%	C×0.03%
C15-150AF	239	100%	75.5	686	C×3%	—	C×0.03%
C15-150A	239	100%	75.5	686	—	—	C×0.03%
C15-125AFE	207	83.3%	78.7	714	C×3%	C×10%	C×0.03%
C20-150AFE	233	75.0%	98.2	669	C×3%	C×10%	C×0.03%
C20-125AFE	202	32.5%	102	696	C×3%	C×10%	C×0.03%

2. 2 練混ぜ方法

練混ぜは、現場施工を目標としているため、傾胴型ミキサーを用いて行なった。投入は、土約半量、セメント全量、土残量を投入し、空練りを 30 秒行ってから、水全量を投入し 3 分間練り混ぜた。

2. 3 養生方法

養生は、打込み直後から材齢 7 日まで型枠養生とした。材齢 7 日後以降は、型枠から脱型し、気中養生とした。ただし、型枠養生、気中養生共に、室温は $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ とし、相対湿度は $50 \pm 5\% \text{ RH}$ とした。

3. 実験方法

3. 1 フレッシュ性状に関する実験

(a) スランブ試験

スランブ試験は、練混ぜ直後に、JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」に準じて行なった。なお、試験時に、スランブフロー値も併せて測定した。

(b) 空気量測定試験

空気量は、練混ぜ直後に、JIS A 1128「空気量測定試験」に準じて行なった。なお、試験時に、単位容積質量

も併せて測定した。

(c) 練上り温度測定試験

練上り温度は、練混ぜ直後に、アルコール棒温度計を用いて測定した。

3. 2 力学特性に関する実験

(a) 曲げ強さ試験

曲げ強さ試験は、JIS R 5201「セメントの物理的試験方法」に準じて行なった。各試験の材齢は、7 日、28 日、56 日、91 日とした。

(b) 圧縮強さ試験

圧縮強さ試験は、JIS R 5201「セメントの物理的試験方法」に準じて行なった。各試験の材齢は、7 日、28 日、56 日、91 日とした。ただし、圧縮試験の載荷面は、52 × 40 mm の面積とした。

3. 3 質量変化に関する実験

乾燥による質量減少率を求めるために、試験体の質量変化測定を行った。測定は材齢 1 日、2 日、3 日、5 日、7 日、8 日、9 日、10 日、12 日、14 日、17 日、21 日、24 日、28 日、31 日、35 日、38 日、42 日、45 日、49 日、52 日、56 日、63 日、70 日、77 日、84 日、91 日に行った。なお、打込み直後から材齢 7 日までは型枠養生のまま測定し、質量減少率は、(1)式により算出した。

$$\Delta M = \frac{m_0 - m_x}{m_0} \times 100 \quad \dots(1)$$

ここに、 ΔM : 質量変化率(%), m_0 : 打込み直後の質量、 m_x : 材齢 x 日の質量

3. 4 乾燥収縮に関する実験

乾燥による収縮率を求めるために、試験体の長さ変化測定を行った。測定は、材齢 7 日、8 日、9 日、10 日、12 日、14 日、17 日、21 日、24 日、28 日、31 日、35 日、38 日、42 日、45 日、49 日、52 日、56 日、63 日、70 日、77 日、84 日、91 日に行った。なお、長さ変化率は(2)式により算出した。

$$\Delta L = \frac{l_7 - l_x}{l_7} \times 100 \quad \dots(2)$$

ここに、 ΔL : 長さ変化率(%), l_7 : 材齢 7 日の長さ、 l_x : 材齢 x 日の長さ

4. 実験結果および考察

4. 1 フレッシュ性状について

フレッシュ性状に関するスランブ試験、空気量測定試験、練上り温度測定試験の結果を、表－3 に示す。

土に対するセメント量が 15%を超えると、AE 剤を混入しても極端にワーカビリティが悪くなった。また、土に対するセメント量が 15%を超えてかつ水量が少なくなると、混和材料を混入してもダマになる傾向にあった。

4. 2 力学特性について

曲げ強さ試験の結果および圧縮強さ試験のを表－4 に示す。なお、調合名 C0-150, C3-150FE, C5-150FE の材齢 7 日強さについては、低強度のため測定不能であった。

表－3 フレッシュ性状に関する実験結果

調合名	スランブ (cm)	スランブ フロー(mm)	空気量	単位容積 質量(kg/ℓ)	練上り 温度(℃)
C0-150	—	—	—	—	14.0
C3-150FE	15.8	243	1.4%	2.02	17.0
C5-150FE	15.6	235	1.6%	2.02	18.0
C7-150FE	14.7	241	2.4%	2.02	15.0
C7-125FE	18.0	348	3.0%	2.06	23.0
C7-100FE	16.0	433	9.0%	1.98	22.5
C10-150FE	14.3	235	2.8%	2.02	16.0
C10-125FE	16.4	440	6.2%	2.02	24.0
C10-100FE	15.3	461	測定不能	1.79	23.0
C15-150AFE	1.8	200	1.9%	2.06	21.0
C15-150AF	2.4	200	4.6%	2.04	21.0
C15-150A	2.1	200	4.0%	2.06	21.5
C15-125AFE	0.2	200	4.1%	2.11	19.0
C20-150AFE	0.4	200	4.0%	2.10	20.0
C20-125AFE	8.5	298	3.7%	2.15	20.5

表－4 強さ試験に関する実験結果

調合名	強さ (N/mm ²)	材齢			
		7日	28日	56日	91日
C0-150	曲げ	—	0.08	0.06	0.12
	圧縮	—	0.42	0.37	0.30
C3-150FE	曲げ	—	0.09	0.08	0.08
	圧縮	—	0.66	0.49	0.43
C5-150FE	曲げ	—	0.20	0.15	0.16
	圧縮	—	1.47	1.11	0.87
C7-150FE	曲げ	0.18	0.32	0.21	0.20
	圧縮	1.76	1.83	1.84	1.37
C7-125FE	曲げ	0.60	0.49	0.39	0.45
	圧縮	3.09	4.06	3.76	2.66
C7-100FE	曲げ	0.77	1.25	0.98	1.38
	圧縮	4.48	7.30	6.63	6.07
C10-150FE	曲げ	0.71	0.72	0.75	0.61
	圧縮	4.26	4.98	5.65	4.95
C10-125FE	曲げ	1.47	1.28	1.18	0.83
	圧縮	6.44	7.41	8.06	8.13
C10-100FE	曲げ	1.37	1.64	1.65	1.55
	圧縮	7.79	10.94	11.78	9.52
C15-150AFE	曲げ	1.34	2.10	1.34	—
	圧縮	5.60	9.30	10.22	—
C15-150AF	曲げ	0.91	1.18	0.57	—
	圧縮	4.62	7.51	7.95	—
C15-150A	曲げ	1.84	1.36	1.69	—
	圧縮	8.08	12.39	14.05	—
C15-125AFE	曲げ	2.43	3.57	3.72	—
	圧縮	11.74	19.47	21.30	—
C20-150AFE	曲げ	3.41	4.60	4.60	—
	圧縮	17.00	24.28	27.41	—
C20-125AFE	曲げ	2.62	4.87	5.62	—
	圧縮	18.77	22.46	31.33	—

注：—は、欠測を示す。

また、調合名 C15-150AFE, C15-150AF, C15-150A, C15-125AFE, C20-150AFE, C20-125AFE の材齢 91 日については、材齢が 91 日に到達していないため、欠測とした。

曲げ強さおよび圧縮強さ共に、土に対するセメント量が 7%以下の調合であれば、材齢 28 日で強度発現が頭打ちとなっていた。これは、土に対するセメント量が 7%以下だと、セメント量の絶対値が小さく、かつ気中養生としたため、水和反応に必要な水およびセメントが不足していたからだと考えられる。

材齢 28 日の曲げおよび圧縮強さに対する各材齢における曲げおよび圧縮強さの関係を図－1 に、積算温度に

よる圧縮強さを図－ 2 に示す。材齢 7 日の強さは、28 日に対して、曲げ強さが 0.69 倍、圧縮強さが 0.71 倍となっていた。また、材齢 56 日、91 日においては、材齢 28 日に対して、曲げ強さ、圧縮強さ共に差は見られなかった。さらに、積算温度（(1)式）による圧縮強さにおいても、840 ° D・D（28 日、20 °C）以後は強度発現が少なかった。したがって、セメントを混入した壁土の強さ管理は、材齢 28 日で行うべきであろう。

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta z + 10) \cdots (1)$$

ここに、M：材齢 n 日までの積算温度（° D・D）

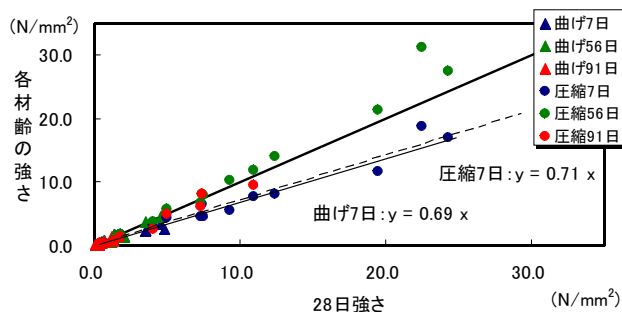
z：材齢（日）

θ z：材齢 z 日における日平均気温（°C）

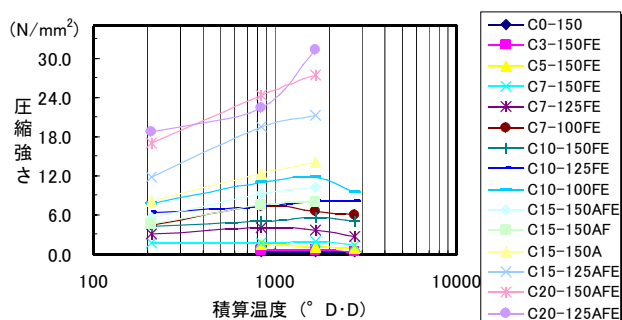
圧縮強さと曲げ強さとの関係を図－ 3 に示す。材齢にかかわらず、圧縮強さと曲げ強さとの関係は、一義的な関係であった。なお、曲げ強さは、圧縮強さの約 1/5.78 倍であった。

水セメント比と材齢 28 日における圧縮強さとの関係を図－ 4 に示す。また、セメント水比と材齢 28 日における圧縮強さとの関係を図－ 5 に示す。両者の関係とも、コンクリートと同様な関係にあった。したがって、コンクリートの調合設計と同様な方法で設計できる。

圧縮強さに及ぼす混和材料の影響を図－ 6 に示す。調合名 C15-150A、C15-150AF、C15-150AFE、C10-100FE は、それぞれ水セメント比が 100%と同じであり、混和材料の混入種類が異なっている調合である。混和材料として、

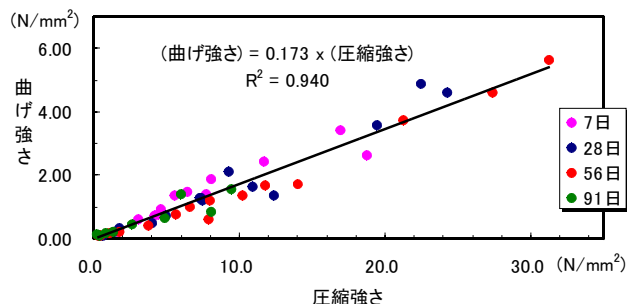


図－ 1 材齢 28 日の強さに対する各材齢の強さ

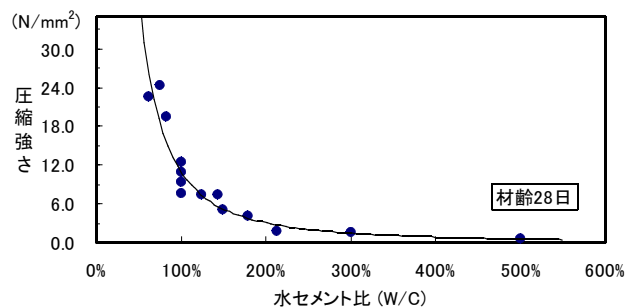


図－ 2 積算温度による圧縮強さ

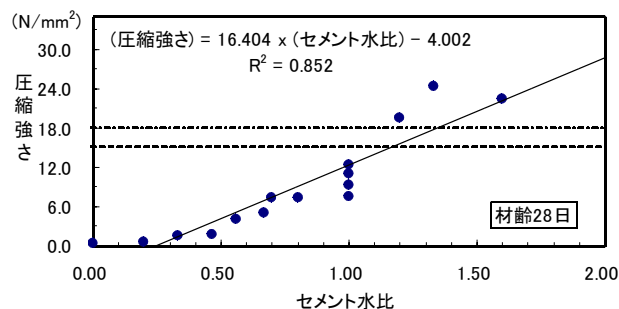
AE 剤しか混入しない調合が最も強かった。ただし、C15-150AFE と C10-100FE との比較より、AE 剤を混入しない調合の方が強くなった。したがって、圧縮強さの観点だけを考慮すると、混和剤は混入しない調合にすべきだと思われる。しかしながら、ワーカビリティの観点から、スランプ値が小さくなる調合については、AE 剤を混入すべきであろう。なお、膨張材の有無では、膨張材を混入した方が強くなった。



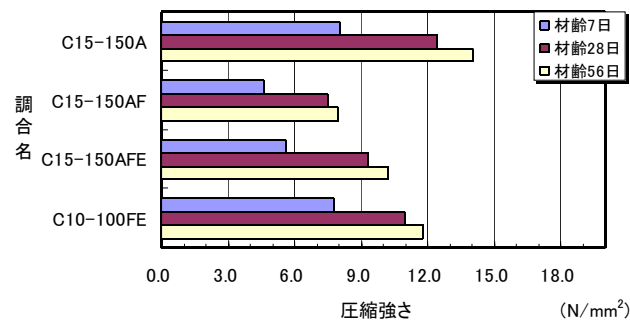
図－ 3 圧縮強さと曲げ強さとの関係



図－ 4 水セメント比と圧縮強さの関係



図－ 5 セメント水比と圧縮強さの関係



図－ 6 圧縮強さに及ぼす混和材料の影響

4. 3 乾燥収縮について

質量減少率および長さ変化率の測定結果をモデル化したものを図－7に示す。質量減少率は、減少率の変化推移から、初期安定期、質量減少促進期、質量減少期、質量減少安定期に分けられることが分かった。また、減少率の推移から長さ変化率は、初期安定期、長さ変化促進期、長さ変化期、長さ変化安定期に分けられることが分かった。これらの期間についての材齢を、表－5に示す。

水土比（W/S）と安定期における長さ変化率との関係を図－8に示す。水土比が大きくなると長さ変化率は大きくなる傾向にあった。しかし相関係数は 0.67 と、相関は強くなかった。

期間別により、促進減少期および減少期における質量減少率と長さ変化率との関係を図－9に示す。促進減少期における質量減少率と長さ変化促進減少率との相関係数は 0.559 であり、質量減少期および長さ変化減少期の相関係数は 0.569 であった。したがって各期間における両者の関係はないと考えられる。

混和剤による長さ変化率の影響を図－10に示す。本研究では混和剤による影響はみられなかった。これは、膨張材が影響したと考えられる初期材齢の材齢7日までを型枠養生としたため、長さ変化の測定を実施していないためと考えられる。

5. まとめ

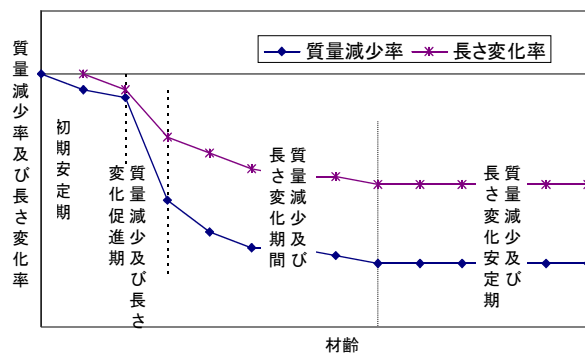
本研究からの成果を以下に示す。

- 1) 圧縮強さは、コンクリートと同様に、セメント水比および水セメントと関係があった。
- 2) 曲げ強さは、調合にかかわらず、圧縮強さの約 17% であった。
- 3) 圧縮強さには、混和材料の影響が大きい。
- 4) 調合の差による乾燥収縮の影響はみられなかった。
- 5) 長さ変化に関しては、混和剤の影響もみられなかった。

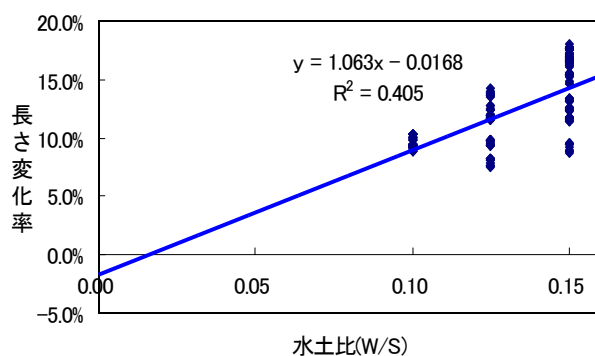
表－5 質量減少および長さ変化率の期間

調合名	質量減少率				長さ変化率			
	初期 安定期	質量減少 促進期	質量変化期	質量減少 安定期	初期 安定期	長さ変化 促進期	長さ変化期	長さ変化 安定期
C0-150	-	0～5日	5～10日	10～91日	-	7～10日	10～21日	21～91日
C3-150FE	-	0～2日	2～17日	17～91日	-	7～12日	12～25日	25～91日
C5-150FE	-	0～2日	2～17日	17～91日	-	7～14日	14～28日	28～91日
C7-150FE	-	0～3日	3～14日	14～91日	-	7～9日	9～31日	31～91日
C7-125FE	0～7日	7～9日	9～31日	31～91日	7～9日	9～13日	13～17日	17～91日
C7-100FE	0～7日	7～9日	9～31日	31～91日	7～9日	9～13日	13～17日	17～91日
C10-150FE	-	0～3日	3～21日	21～91日	-	7～9日	9～25日	25～91日
C10-125FE	0～7日	7～9日	9～28日	28～90日	-	7～14日	14～35日	35～90日
C10-100FE	0～7日	7～9日	9～28日	28～91日	-	7～15日	15～35日	35～91日
C15-150AFE	0～7日	7～9日	9～42日	42～91日	7～9日	9～14日	14～34日	34～91日
C15-150AF	0～7日	7～9日	9～42日	42～92日	7～9日	9～14日	14～34日	34～92日
C15-150A	0～7日	7～9日	9～42日	42～93日	7～9日	9～14日	14～34日	34～93日
C15-125AFE	0～7日	7～9日	9～34日	34～91日	-	7～12日	12～34日	34～91日
C20-150AFE	0～7日	7～9日	9～34日	34～91日	-	7～9日	9～34日	34～91日
C20-125AFE	0～7日	7～9日	9～34日	34～91日	-	7～9日	9～34日	34～91日

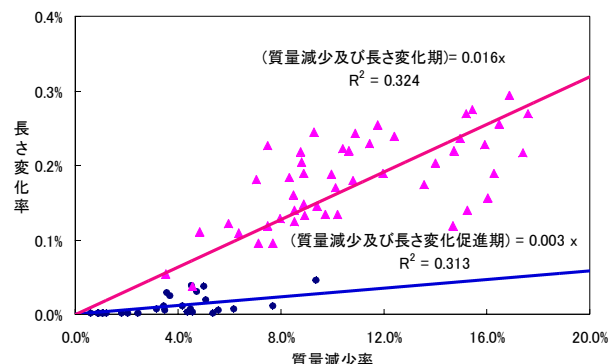
注：-は、欠測を示す。



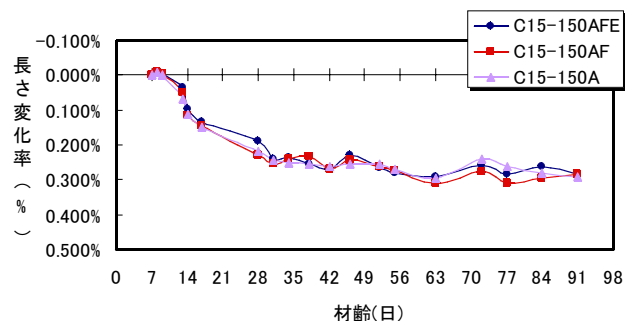
図－7 質量変化および長さ変化結果のモデル図



図－8 水土比と長さ変化との関係



図－9 期間別の質量減少率と長さ変化との関係



図－10 混和材料による長さ変化の影響